บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการวิจัยพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเสร็จ

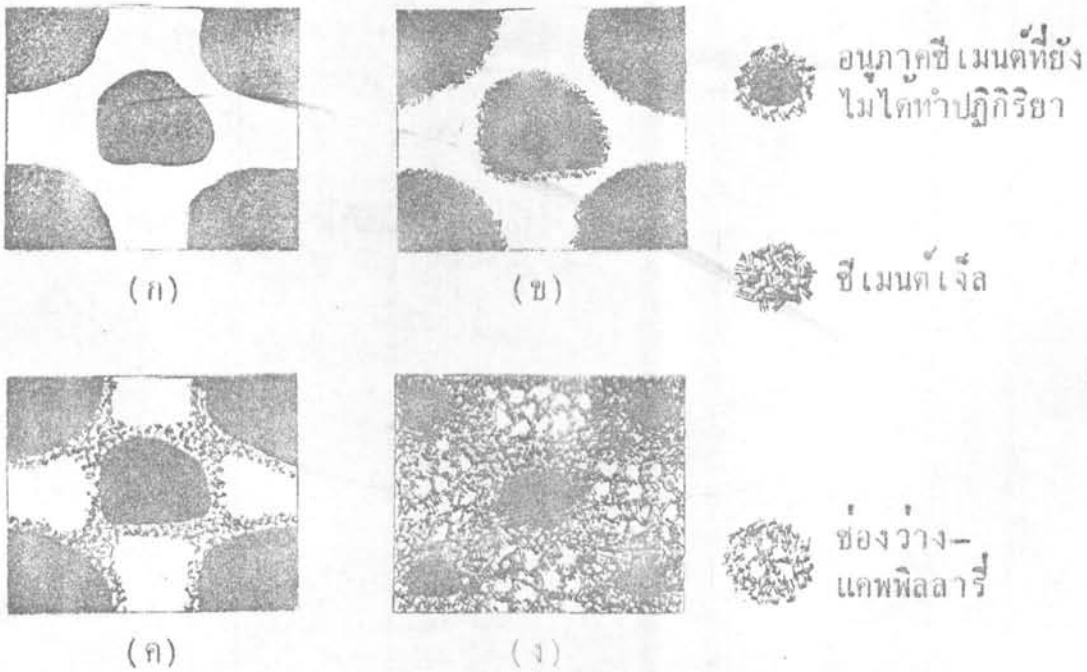
สำหรับวิธีดำเนินการวิเคราะห์ผลจากการทดลองพฤติกรรมของคอนกรีต-ผสมเสร็จนี้ ในขั้นต้นจะได้กล่าวถึงธรรมชาติของคอนกรีต รวมทั้งนิยาม และทฤษฎีที่กล่าวถึงอิทธิพลขององค์ประกอบต่างๆต่อสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตโดยทั่วไปเสียก่อน ต่อจากนั้นจึงจะได้อาศัยทฤษฎีเกี่ยวกับธรรมชาติของคอนกรีตนี้ไปใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์อิทธิพลของเวลาการผสม และการผสมซ้ำที่มีต่อคอนกรีต-ผสมเสร็จตามลำดับไป

4.1 ธรรมชาติของคอนกรีต

4.1.1 <u>โครงสร้างรวมของคอนกรีต</u> เมื่อจะพิจารณาถึงธรรมชาติของคอนกรีต จะต้องนึกถึงคอนกรีตในสภาพที่โครงสร้างเกิดจากองค์ประกอบ 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ มวลรวม กับ ซีเมนต์เพสท์ และโดยที่ปริมาตรของคอนกรีตสดที่กระทุ้งจนแน่นมีค่าสูงกว่า ปริมาตรที่กระทุ้งจนแน่นของมวลรวมที่ประกอบกันเป็นคอนกรีตนั้นอยู่มาก จึงแสดงว่า อนุภาคแต่ละชิ้นของมวลรวมจะฝังตัวและถูกหุ้มแยกจากกันด้วยซีเมนต์เพสท์ (และโพรงอากาศ) ซึ่งยืนยันได้จากการที่คอนกรีตสดมีสภาพพลาสติก นอกจากนั้นเมื่อสังเกตดูหน้าตัดส่วนที่แตกออกจากกันของคอนกรีตที่แข็งตัว ก็จะพบว่า อนุภาคแต่ละชิ้นของมวลรวม ไม่เพียงแต่จะถูกแยกออกจากกันในสภาพที่เป็นคอนกรีตสดเท่านั้น แต่ยังถูกแยกออกจากกันแม้ในสภาพที่แข็งตัวแล้วด้วย จากโครงสร้างคอนกรีตดังกล่าว จึงสรุปได้ว่า ความแข็งแรงของคอนกรีตนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของกลุ่มมวลรวมที่จัดตัวแน่น แต่จะขึ้นอยู่กับ ความแข็งแรงของซีเมนต์เพสท์ และความแข็งแรงของอนุภาคมวลรวมแต่ละชิ้น และสำหรับคอนกรีตโดยทั่วไปแล้ว ซีเมนต์-เพสท์จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าอนุภาคมวลรวมแต่ละชิ้น ดังนั้น โครงสร้างและความแข็งแรงของซีเมนต์เพสท์ จึงเป็นตัวแปรสำคัญในการพิจารณาถึงความแข็งแรงของคอนกรีต

4.1.2 โครงสร้างของซีเมนต์เพสท์ ซีเมนต์เพสท์สด ก็คือการกระจายของอนุภาคซีเมนต์ในน้ำ ซึ่งจะมีการจัดตัวเป็นโครงสร้างอันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงดึงและแรงผลักระหว่างอนุภาคซีเมนต์ด้วยกัน การจัดตัวดังกล่าวเกิดมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างองค์ประกอบต่างๆของซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งผลจากปฏิกิริยาทางเคมีดังกล่าวเรียกกันว่า "ไฮเดรทซีเมนต์" และปฏิกิริยาทางเคมีนั้นเรียกกันว่า "ปฏิกิริยาไฮเดรชัน"

ถึงแม้ไฮเดรทซีเมนต์จะเป็นผลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมี แต่สมบัติในการรับแรงของซีเมนต์เพสท์ หรือคอนกรีตที่แข็งตัว กลับไม่ค่อยมีผลเนื่องมาจากส่วนประกอบทางเคมีของไฮเดรทซีเมนต์นัก อิทธิพลส่วนใหญ่มักจะมาจากโครงสร้างทางฟิสิกส์ของไฮเดรทซีเมนต์ ดังจะกล่าวตามลำดับดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการเกิดซีเมนต์เจ็ล(4)

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.1 (ก) ถึง (ง) เป็นรูปแบบจำลองลำดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำโดยสังเขป เมื่อผสมซีเมนต์กับน้ำเข้าด้วยกัน จะเกิดซีเมนต์เพสท์ที่มีลักษณะพลาสติกขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะอนุภาคของซีเมนต์ (และฟองอากาศ) จะกระจายแผ่ไปทั่วในน้ำ แต่เหตุผลสำคัญกว่านี้ก็คือ เกิดแรงระหว่างอนุภาคที่พยายามดึงให้อนุภาคมารวมกัน และในขณะเดียวกันก็ป้องกันไม่ให้อนุภาคถึงกับเข้ามาแตะกัน สภาพดังกล่าวเกิดจากแรงดึงดูด และแรงผลักระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคซีเมนต์ในที่นี้คือ van der Waals force ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคซีเมนต์นั้นเกิดจาก electrostatic repulsion และ disjoining pressure ดังนั้นอนุภาคซีเมนต์ที่แขวนลอยในน้ำจะจัดระยะห่างจากกันโดยมีพลังงานศักย์ที่เกิดจากแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองมีค่าน้อยที่สุด(5) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก)

เมื่อซีเมนต์สัมผัสน้ำก็จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นทันที โดยเกิดที่บริเวณผิวของเม็ดซีเมนต์ก่อน ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างองค์ประกอบของซีเมนต์กับน้ำนี้ จะทำให้เกิดของแข็งในสภาพใหม่ขึ้น อันประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ "อนุภาคเจ็ล" ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วงคอลลอยด์ (นักเคมีเรียกอนุภาคในสารละลายที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 mμ แต่เล็กกว่า 200 mμ ว่า "คอลลอยด์") มีลักษณะคล้ายวุ้นที่เกือบจะเป็นผลึก และอีกส่วนก็คือ ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งไม่ค่อยมีบทบาทสำคัญในการพิจารณาโครงสร้างทางฟิสิกส์ของไฮเดรทซีเมนต์นัก ของแข็งในสภาพใหม่นี้รวมเรียกว่า "ซีเมนต์เจ็ล" ซึ่งจะจัดตัวเป็นโครงสร้างต่อเนื่องกันไปในไฮเดรทซีเมนต์ต่อไป และจากการที่ได้พบว่า(6) พื้นที่ผิวจำเพาะของซีเมนต์เจ็ล และความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อหน่วยของปริมาณน้ำที่ใช้ผสม มีค่าค่อนข้างคงที่แทบทุกขณะของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงพอสรุปได้ว่า สำหรับซีเมนต์ที่มีองค์ประกอบหนึ่งๆ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะก่อให้เกิดซีเมนต์เจ็ลชนิด และรูปร่างเดียวกันตลอดเวลา

ซีเมนต์เจ็ลดังกล่าวนี้ มีลักษณะทั่วไปเป็นเส้นใยที่ขัดกันเป็นตาข่ายแผ่ขยายออก แต่ยังมีส่วนที่ติดยึดอยู่กับเม็ดซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา และเนื่องจากผลผลิตส่วนใหญ่คือ อนุภาคเจ็ลมีขนาดอยู่ในช่วงคอลลอยด์ ซีเมนต์เจ็ลจึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 650 ตร.ม./ลบ.ซ.ม. หรือ 250 ตร.ม./กรัม(6) และสามารถดูดน้ำเข้าไป

อยู่ระหว่างชั้นหรือโพรงของโครงสร้างซีเมนต์เจ็ลได้เป็นจำนวนมาก ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ[5] ซีเมนต์เจ็ลนี้มีความพรุนสูงถึงร้อยละ 40 ถึง 55 ของปริมาตรทั้งหมด แม้แต่ซีเมนต์เจ็ลที่มีความหนาแน่นสูงที่สุด ก็ยังมีความพรุนถึงร้อยละ 28 รูพรุนเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก คือ มีเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 15 ถึง 20Å กระจายไปทั่วซีเมนต์เจ็ล เรียกรูพรุนเหล่านี้ว่า "รูพรุนของเจ็ล"

ซีเมนต์เจ็ลซึ่งมีสภาพเป็นของแข็งนี้จะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นจากปริมาตรของของแข็งเดิม คือซีเมนต์ที่เข้าทำปฏิกิริยา โดยไม่ทำให้ปริมาตรซีเมนต์เพสท์ทั้งหมดคือซีเมนต์กับน้ำเพิ่มขึ้น กล่าวคือ[5] ซีเมนต์ที่มีปริมาตร 1 ลบ.ซ.ม. เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้เกิดซีเมนต์เจ็ลเฉพาะส่วนที่เป็นของแข็งขึ้นมีปริมาตร 1.6 ลบ.ซ.ม. นั่นก็คือ ต้องมีที่ว่าง 0.6 ลบ.ซ.ม.สำหรับการเพิ่มปริมาตรของซีเมนต์เจ็ล หรือเท่ากับ ต้องมีที่ว่าง 0.19 ลบ.ซ.ม. ต่อน้ำหนักซีเมนต์ที่เข้าทำปฏิกิริยา 1 กรัม แต่ดังได้กล่าวแล้วว่า ซีเมนต์เจ็ลมีความพรุนสูง นอกจากปริมาณน้ำที่จะเข้าทำปฏิกิริยาเกิดซีเมนต์เจ็ลส่วนที่เป็นของแข็งแล้ว ยังต้องการปริมาณน้ำที่จะเข้าไปเติมในรูพรุนของเจ็ลอีก ดังนั้นปริมาตรของซีเมนต์เพสท์ แทนที่จะเป็น 1.6 ลบ.ซ.ม./ลบ.ซ.ม. ของซีเมนต์ จะต้องเพิ่มขึ้นเป็น 1.6/0.72 = 2.2 ลบ.ซ.ม./ลบ.ซ.ม.ของซีเมนต์

เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจนซีเมนต์เจ็ลหุ้มเม็ดซีเมนต์หมดดังรูปที่ 4.1(ข) ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะหยุดไปขณะหนึ่ง เมื่อพ้นระยะนี้ไป ซีเมนต์เจ็ลบางส่วนจะแตกตัวออก ทำให้น้ำเข้าไปสัมผัสกับผิวซีเมนต์ เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้อีก นั่นคือ ซีเมนต์เจ็ลจะ "ตกตะกอน" ลงในช่องว่างซึ่งมีน้ำเต็มที่เรียกว่า "ช่องว่างแคพพิลลารี่" และเนื่องจากซีเมนต์ 1 ลบ.ซ.ม.ทำให้เกิดซีเมนต์เจ็ลปริมาตร 2.2 ลบ.ซ.ม. ดังนั้นซีเมนต์เจ็ลที่เกิดขึ้นใหม่นี้ ครึ่งหนึ่งจะเกิดขึ้นในบริเวณที่แต่เดิมเป็นซีเมนต์ และอีกครึ่งหนึ่งจะตกตะกอนลงในช่องว่างแคพพิลลารี่ จนในที่สุดก็จะมีการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ ด้วยซีเมนต์เจ็ลที่เกิดขึ้นใหม่นี้ ทำให้ซีเมนต์เพสท์เหนียวขึ้น เกิดเป็นโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ค)

สำหรับคอนกรีต หรือซีเมนต์เพสท์ที่เกิดขึ้นในสภาพการใช้งานจริงๆ จะไม่มีการบ่มจนปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไปถึงที่สุด เมื่อน้ำในช่องว่างแคพพิลลารี่ไม่อิ่มตัว ปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะช้าลง หรือหยุดลง เพราะน้ำที่จะถูกดูดเข้าไปทำปฏิกิริยากับ

ซีเมนต์จะต้องได้มาจากช่องว่างแคพพิลลารีนี้ ดังนั้นโดยทั่วไป ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะดำเนินต่อไปจากรูปที่ 4.1 (ค) โดยมีกระบวนการแผ่กระจายออกของซีเมนต์เจ็ล ในรูปแบบที่ยุ่งยากขึ้น และตกตะกอนลงในโครงสร้างที่ก่อตัวขึ้นในรูปที่ 4.1 (ค) จนในที่สุด ซีเมนต์เจ็ลจากอนุภาคซีเมนต์ทั้งหมดก็จะมาจัดตัวเชื่อมกันเป็นตาข่าย ทำให้ช่องว่างแคพพิลลารีถูกปิดกั้นจนไม่ต่อเนื่องกันในซีเมนต์เพสท์ได้ และซีเมนต์เพสท์ที่แข็งตัว จะประกอบด้วย ซีเมนต์เจ็ล (ซึ่งรวมอนุภาคเจ็ล กับ ผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เข้าด้วยกัน) รูพรุนของเจ็ล ช่องว่างแคพพิลลารี และซีเมนต์ส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา พร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ง)

4.1.3 <u>กำลังของซีเมนต์เพสท์</u> [7] ถึงแม้จะยังไม่มีทฤษฎีใดที่จะอธิบายถึงกำลังของซีเมนต์เจ็ลได้อย่างชัดเจนนัก แต่สำหรับกำลังของโครงสร้างซีเมนต์เพสท์ที่สร้างขึ้นจากซีเมนต์เจ็ล พบว่า [8] ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนโดยปริมาตรของไฮเดรทซีเมนต์ กับ ผลรวมของปริมาตรไฮเดรทซีเมนต์กับช่องว่างแคพพิลลารี ซึ่งเรียกว่า "อัตราส่วนเจ็ลต่อช่องว่าง"

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดซีเมนต์เจ็ลที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของปริมาตรเดิม สำหรับในการพิจารณาต่อไปนี้ [6] จะสมมติให้ปริมาตรของซีเมนต์เจ็ลที่เกิดขึ้นจากซีเมนต์ปริมาตร 1 ลบ.ซ.ม. มีค่าเท่ากับ 2.06 ลบ.ซ.ม.

ให้ c = น้ำหนักของซีเมนต์

v_c = ปริมาตรจำเพาะของซีเมนต์

w_o = ปริมาตรของน้ำที่ใช้ผสม และ

α = เศษส่วนของซีเมนต์ที่ได้ทำปฏิกิริยาไปแล้ว

ดังนั้น ปริมาตรของซีเมนต์เจ็ล = $2.06 c v_c \alpha$ และปริมาตรของช่องว่างทั้งหมด $= c v_c \alpha + w_o$ นั่นคือ อัตราส่วนเจ็ลต่อช่องว่าง เป็น

$$x = \frac{2.06 v_c \alpha}{v_c \alpha + \frac{w_o}{c}} \qquad (4.1)$$

กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดลองโดย Powers [9] มีค่าเป็น $234 x^3$ MN/m^2 โดยไม่ขึ้นอยู่กับ อายุและส่วนผสมของคอนกรีต นั่นคือ กำลังอัด

ของคอนกรีต จะแปรตาม กำลังสามของอัตราส่วนเจ็ลต่อช่องว่าง ส่วนตัวเลข 234 MN/m^2 นั้นจะเป็นค่าที่บอกกำลังที่แท้จริงของเจ็ลที่เกิดจากซีเมนต์แต่ละองค์ประกอบ เพราะเป็นค่ากำลังอัดของคอนกรีตเมื่ออัตราส่วนเจ็ลต่อช่องว่าง มีค่าเป็น 1

4.2 วิเคราะห์อิทธิพลของเวลาการผสม

4.2.1 อิทธิพลของเวลาการผสมที่มีต่อการยุบของคอนกรีต จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 พบว่า การยุบของคอนกรีตทั้ง 2 ส่วนผสม มีค่าลดลงเรื่อยๆอย่างไม่เป็นที่น่าสังเกตนักในช่วง 100 นาทีหลังการผสมครั้งแรก แต่หลังจากเวลาการผสม 100 นาทีเป็นต้นไป การยุบของคอนกรีตจะลดลงอย่างทันทีทันใด คล้ายกันทั้ง 2 ส่วนผสม นอกจากนั้นยังพบอีกว่า คอนกรีตสดจะค่อยๆเปลี่ยนจากสภาพพลาสติกที่ค่อนข้างอ่อนทราย ไปเป็นคอนกรีตสดที่เหนียวขึ้นและค่อนข้างแก่ทราย ตามเวลาการผสมที่ผ่านไป ผลลัพธ์ดังกล่าวนี้เกิดจากสาเหตุ 3 ประการคือ

ประการแรก เกิดจากสภาพสนาม กล่าวคือ เมื่อองค์ประกอบของซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำนั้นจะเกิดความร้อนขึ้น ส่วนหนึ่งของความร้อนนี้จะผ่านเนื้อคอนกรีตออกมา แต่บางส่วนก็คงอยู่ภายใน ทำให้คอนกรีตมีอุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนั้นเมื่อกวนคอนกรีตอยู่ในโม่นาน จะเกิดความเสียดทานระหว่างคอนกรีตด้วยกัน และคอนกรีตกับผนังโม่ก็ทำให้คอนกรีตมีอุณหภูมิสูงขึ้นเช่นเดียวกัน สาเหตุทั้งสองประการนี้เมื่อมาประกอบกับสภาพสนาม คืออุณหภูมิของอากาศบริเวณโดยรอบที่สูงเกิน 30 °ซ. ก็ยิ่งทำให้คอนกรีตในโม่มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นลำดับ การที่คอนกรีตได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณน้ำในคอนกรีตสดระเหยออกไปเรื่อยๆ คอนกรีตสดจึงเหนียวขึ้นและมีค่าการยุบลดลงเป็นลำดับตามเวลาการผสมที่เพิ่มขึ้น

ประการที่สอง เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำกับซีเมนต์ กล่าวคือ นอกจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้น้ำในส่วนผสมบางส่วนเข้ารวมตัวกับซีเมนต์เกิดของแข็งในสภาพใหม่ อันทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมลดลงแล้ว สาเหตุที่สำคัญก็คือ ซีเมนต์เจ็ลที่เกิดขึ้นใหม่นี้ ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2 ยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึงประมาณ 250 ตร.ม./กรัม หรือ 2,500,000 ตร.ซ.ม./กรัม เมื่อเทียบกับของแข็งเดิม คือ ซีเมนต์ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 3,000 ตร.ซ.ม./กรัมแล้ว

จะเห็นว่า พื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้นประมาณ 1,000 เท่า การที่พื้นที่ผิวจำเพาะของของแข็งในซีเมนต์เพสท์มีค่าสูงขึ้น ย่อมทำให้ต้องการปริมาณน้ำที่มาเคลือบผิวของแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อให้ส่วนผสมมีความข้นเหลวคงเดิม ดังนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งก่อให้เกิดซีเมนต์เจ็ลที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ซีเมนต์เพสท์มีสภาพเหนียวขึ้น มีผลให้คอนกรีตมีค่าการยุบลดลง ยิ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินต่อไป ก็ยิ่งทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบลดลงตามไปด้วย

สาเหตุประการสุดท้ายก็คือ เมื่อกวนคอนกรีตอยู่ในโม่เป็นเวลานาน มวลรวมในส่วนผสมบางส่วนจะขัดสีกันเอง และบางส่วนจะเสมือนถูกบดด้วยแผ่นกั้นผสมในโม่ผสม ทำให้ส่วนขนาดคละของมวลรวมผสมนั้นละเอียดลง นั่นคือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมจะเพิ่มขึ้น จึงต้องการปริมาณซีเมนต์เพสท์ที่จะมาเคลือบผิวมวลรวมเพิ่มขึ้น เพื่อให้คอนกรีตมีความข้นเหลวคงเดิม แต่เนื่องจากซีเมนต์เพสท์มีปริมาณคงเดิม คอนกรีตจึงมีความข้นเหลว หรือ การยุบลดลง และการที่ส่วนขนาดคละของมวลรวมผสมละเอียดลง จึงทำให้คอนกรีตสดมีสภาพค่อนข้างแก่ทราย

4.2.2 <u>อิทธิพลของเวลาการผสมที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต</u> จากผลการทดสอบกำลังอัดในบทที่ 3 พบว่า คอนกรีตในช่วงแรกของเวลาการผสมจะมีกำลังอัดคงที่ แต่เมื่อกวนคอนกรีตต่อไปประมาณ 60 – 90 นาที กำลังอัดของคอนกรีตจะสูงขึ้นไปอีกระดับหนึ่ง ซึ่งหลังจากเวลาการผสม 60 – 90 นาทีนี้ไปแล้ว คอนกรีตก็จะมีกำลังอัดคงอยู่ที่ค่าใหม่นี้ โดยมีแนวโน้มไปในทางที่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่งไม่สามารถนำคอนกรีตออกจากโม่ผสมได้อีก นอกจากนี้ยังพบอีกว่า กำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาการผสม 60 – 90 นาทีดังกล่าวแล้วนั้น สำหรับส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์สูงกว่า จะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นคิดเป็นจำนวนส่วนร้อยละ น้อยกว่า ส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำกว่า ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

ปกติแล้ววัตถุประสงค์ในการผสมคอนกรีต ก็เพื่อให้ส่วนผสมแต่ละชนิดกระจายไปทั่วทั้งโม่ทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อสม่ำเสมอ และเพื่อให้ซีเมนต์เพสท์ได้เคลือบผิวของมวลรวมได้หมด เนื่องจากคอนกรีตผสมเสร็จนั้นต้องผสมคอนกรีตปริมาณกราวละ 2 – 3 ลบ.ม. ในระยะแรกของการผสมจึงยังไม่ได้คอนกรีตที่คลุกเคล้ากันเต็มที่ การกวนคอนกรีตอยู่ในโม่ระยะแรกของเวลาการผสมจึงมีส่วนช่วยอย่างมากที่จะทำให้

มวลรวมจัดเรียงตัวกันในซีเมนต์เพสท์ ได้คอนกรีตที่มีเนื้อสม่ำเสมอดียิ่งขึ้น

นอกจากนั้น เมื่อเวลาการผสมเพิ่มขึ้น จากที่กล่าวมาแล้วว่า ปริมาณน้ำในคอนกรีตสดจะระเหยออกไปเรื่อยๆ และเป็นเพราะว่าน้ำส่วนที่ระเหยได้ง่ายที่สุดก็คือ น้ำในช่องว่างแกพพิลลารี่ ดังนั้นผลรวมของปริมาตรไฮเดรทซีเมนต์ กับ ช่องว่างแกพพิลลารี่จะลดลง จากสมการที่ 4.1 จะเห็นว่า อัตราส่วนระหว่างเจ็ลกับช่องว่างจะเพิ่มขึ้นนั่นเอง จึงเป็นเหตุให้หวังได้ว่า กำลังอัดของคอนกรีตจะค่อยสูงขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในคอนกรีตสดระเหยออกไป หรือเวลาการผสมผ่านไป

แต่สาเหตุที่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในระยะหลังการผสมครั้งแรกประมาณ 60 – 90 นาทีผ่านไปแล้ว จะมีค่าค่อนข้างคงที่ ไม่เพิ่มขึ้นมากเหมือนช่วงแรกของเวลาการผสม ก็เป็นเพราะว่า เมื่อเวลาการผสมเพิ่มขึ้น ดังได้กล่าวแล้วว่า คอนกรีตจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น การที่อุณหภูมิของคอนกรีตเพิ่มขึ้นนี้ทำให้คอนกรีตเสียกำลังไปบ้าง ทั้งนี้เพราะ (10) คอนกรีตที่มีอุณหภูมิสูงในขณะที่เกิดการก่อตัว จะทำให้ปฏิกิริยาของซีเมนต์กับน้ำในระยะแรกเป็นไปอย่างรวดเร็ว จึงไม่มีเวลาพอที่ซีเมนต์เจ็ลที่เกิดขึ้นจะกระจายออกจากอนุภาคซีเมนต์ และตกตะกอนอย่างสม่ำเสมอในช่องว่างของเพสท์ได้ทันเหมือนกรณีที่อัตราการทำปฏิกิริยาเป็นไปอย่างปกติ ดังนั้นซีเมนต์เจ็ลที่เกิดขึ้นพร้อมกันเป็นจำนวนมากนี้จะเกาะอยู่รอบอนุภาคซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่จะเกิดขึ้นต่อไป ดำเนินไปได้ช้าและลำบากขึ้น นอกจากนั้น ยังทำให้โครงสร้างทางฟิสิกส์ของซีเมนต์เจ็ลที่เกิดขึ้นเป็นโครงสร้างเบื้องต้น มีรูพรุนสูง จนกระทั่งซีเมนต์–เจ็ลที่เกิดต่อมาไม่สามารถจะเติมช่องว่างที่เป็นรูพรุนเหล่านี้ให้เต็มได้ ปัจจัยทั้งสองประการนี้เป็นสาเหตุทำให้อัตราส่วนระหว่างเจ็ลกับช่องว่างลดลง หรือ กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

การที่กำลังอัดของคอนกรีตลดลงนี้ มีผลต่อเมื่อคอนกรีตถูกกวนอยู่ในโม่เป็นระยะเวลาหนึ่ง และคอนกรีตไม่สามารถถ่ายความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างมากจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การเสียดทาน และอุณหภูมิโดยรอบ ได้ทันจนกระทั่งถึงเวลาก่อตัว แต่อัตราการลดของกำลังอัดของคอนกรีตนี้ ก็ยังไม่มากไปกว่า อัตราการเพิ่มของกำลังอัดของคอนกรีตจากสาเหตุแรกที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงหลังของเวลาการผสม มีค่าค่อนข้างคงที่โดยมีแนวโน้มไปในทางที่จะเพิ่มค่าขึ้นเล็กน้อย

ส่วนการที่ส่วนผสมซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์สูงกว่า จะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของเวลาการผสมน้อยกว่า ส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำกว่านั้น ก็สอดคล้องกับเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ส่วนผสมซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์สูงกว่า ก็ย่อมจะให้ความร้อนอันเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันปริมาณที่มากกว่า ทำให้อัตราส่วนระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิคอนกรีต กับอิทธิพลของการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์สูง จึงมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นน้อยกว่า คอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำกว่า

4.3 วิเคราะห์อิทธิพลของการผสมซ้ำ

4.3.1 อิทธิพลของการผสมซ้ำที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต จากผลการทดลองพบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตจะลดลงเมื่อเติมน้ำเข้าไปเพื่อควบคุมให้การยุบมีค่าคงที่ โดยมีอัตราการลดลงเกือบจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับเวลาการผสมที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะจุดแล้ว ปริมาณที่ลดลงของกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต ดูจะไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปก่อนที่จะเก็บตัวอย่างคอนกรีตนั้นๆ อิทธิพลของการผสมซ้ำดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ

เป็นที่ทราบกันดีว่า ค่าการยุบนั้นเป็นค่าที่ใช้วัดความข้นเหลวของคอนกรีต ดังนั้นจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำในคอนกรีตสด ทั้งนี้มีผู้พบว่า[11] การเปลี่ยนแปลงในความข้นเหลวของคอนกรีต ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในคอนกรีตสดเพียงอย่างเดียว จะมีค่าเท่ากันโดยไม่ต้องคำนึงถึงส่วนผสมของคอนกรีต ดังนั้น ถ้าพิจารณาเพียงผิวเผินแล้ว เมื่อควบคุมการยุบของคอนกรีตผสมเสร็จให้มีค่าคงที่แล้ว ปริมาณน้ำในส่วนผสมก็ควรจะคงที่ด้วย นั่นคือ กำลังอัดของคอนกรีตก็ควรจะคงที่ไม่ลดลงตามผลการทดลอง แต่การที่กำลังอัดของคอนกรีตลดลงนั้น เป็นเพราะมีสาเหตุที่ทำให้ส่วนผสมรวมทั้งสภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปด้วย กล่าวคือ

1. ในกรณีที่คอนกรีตมีค่าการยุบลดลงเนื่องจากน้ำในคอนกรีตสดบางส่วนระเหยออกไปเพียงอย่างเดียวแล้ว การเติมน้ำเพื่อชดเชยส่วนที่ระเหยไป ก็ควรจะทำให้การยุบกลับมีค่าคงเดิม และกำลังอัดของคอนกรีตก็คงจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่สำหรับคอนกรีตผสมเสร็จที่มีการยุบลดลงเนื่องจากถูกกวนอยู่ในโม่ผสมเป็นเวลานาน

นั้น ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 ว่า สาเหตุไม่ได้เกิดจากการระเหยของน้ำในส่วนผสมเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องมาจากซีเมนต์เจ็ลที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีสมบัติที่ต้องการปริมาณน้ำเพื่อเคลือบผิวเพิ่มขึ้น (เพื่อให้ความข้นเหลวคงเดิม) ด้วย ดังนั้น การเติมน้ำเพื่อทำให้คอนกรีตมีความข้นเหลวคงที่ จึงทำให้ปริมาณน้ำในซีเมนต์เพสท์เพิ่มขึ้น หรืออัตราส่วนเจ็ลต่อช่องว่างในซีเมนต์เพสท์ลดลง ซีเมนต์เพสท์และคอนกรีตที่เกิดจากซีเมนต์เพสท์ดังกล่าวจึงมีกำลังอัดลดลง

2. นอกจากนั้นการกวนคอนกรีตผสมเสร็จอยู่ในโม่ผสมเป็นเวลานาน จะทำให้ส่วนขนาดคละของมวลรวมผสมในคอนกรีตละเอียดลง (ดูหัวข้อที่ 4.2.1) สำหรับส่วนผสมซึ่งมีปริมาณซีเมนต์คงที่ คอนกรีตที่มวลรวมผสมมีส่วนขนาดคละละเอียดย่อมต้องการปริมาณน้ำมากกว่า คอนกรีตที่มวลรวมผสมมีส่วนขนาดคละหยาบ เพื่อทำให้ส่วนผสมมีความข้นเหลวเท่ากัน ดังนั้นการเติมน้ำเพื่อชดเชยอิทธิพลเนื่องจากมวลรวมผสมมีส่วนขนาดคละที่ละเอียดลงนี้ ก็เช่นเดียวกัน จะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงด้วย

3. สาเหตุประการสุดท้ายนี้ เกิดจากอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศในสนาม และอุณหภูมิของคอนกรีตที่มีต่อความข้นเหลวของคอนกรีต สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศในสนามนั้นได้พบว่า[12] คอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกัน (รวมทั้งปริมาณน้ำด้วย) เมื่อผสมในขณะที่อุณหภูมิของอากาศในสนามสูงกว่า จะมีค่าการยุบน้อยกว่า เมื่อผสมในขณะที่อุณหภูมิของอากาศในสนามต่ำกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศในสนามสูงขึ้น ปริมาณน้ำในส่วนผสมจะต้องเพิ่มขึ้น เพื่อให้คอนกรีตมีความข้นเหลวคงเดิม ส่วนอิทธิพลเนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีตก็เช่นเดียวกัน มีผู้พบว่า[13] เมื่ออุณหภูมิของคอนกรีตสูงขึ้น ปริมาณน้ำคิดเป็นร้อยละที่ต้องการในการเปลี่ยนแปลงการยุบของคอนกรีตไป 1 นิ้วจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาในการทดลองจะเห็นว่า ทั้งอุณหภูมิของอากาศในบริเวณทำการทดลอง และอุณหภูมิของคอนกรีตจะสูงขึ้นตามเวลาการผสม จึงสรุปได้ว่า การเติมน้ำเพื่อให้การยุบของคอนกรีตที่ลดลง กลับมีค่าคงเดิมในอากาศร้อนนี้ จะทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น คอนกรีตจึงมีกำลังอัดลดลง

จากเหตุผลทั้ง 3 ประการข้างต้น กำลังอัดของคอนกรีตก็ควรจะมีค่า

ลดลงเป็นลำดับตามเวลาการผสม และควรจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปก่อนที่จะเก็บตัวอย่างนั้นๆด้วย แต่เหตุที่ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับผลในประการหลังก็เป็นเพราะ โดยปกติเมื่อเติมน้ำเพิ่มเข้าไปในโม่ผสมแล้ว มาตรฐานของ ASTM C94 กำหนดให้หมุนโม่ผสมต่อด้วยอัตราเร็วที่ใช้ผสมอย่างน้อย 20 – 30 รอบ จึงจะถือว่า คอนกรีตในโม่ผสมได้ผสมเข้ากันดีกับน้ำที่เติมเข้าไปใหม่ แต่ในการทดลองนี้กระทำตามสภาพการทำงานจริงๆในสนาม จากตารางที่ 3.14 และ 3.15 จะพบว่า หลังจากเติมน้ำเข้าไปแล้ว ก่อนจะเก็บตัวอย่างคอนกรีตนั้น หมุนโม่ผสมต่อด้วยอัตราเร็วที่ใช้ผสมเพียง 10 – 15 รอบเป็นส่วนใหญ่ คอนกรีตยังไม่ทันผสมเข้ากันดีกับน้ำที่เติมเข้าไปใหม่ จึงทำให้ดูเหมือนว่า ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปไม่มีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีตที่ลดลง

4.3.2 <u>อิทธิพลของการผสมน้ำที่มีต่อลักษณะของคอนกรีตสด</u> เป็นเช่นเดียวกับอิทธิพลของเวลาการผสม คือ คอนกรีตสดจะเปลี่ยนสภาพจากคอนกรีตที่ค่อนข้างอ่อนทราย ไปเป็นคอนกรีตสดที่ค่อนข้างแก่ทรายเมื่อเวลาการผสมเพิ่มขึ้น สำหรับสาเหตุก็ดังได้กล่าวมาแล้วในเรื่องอิทธิพลของเวลาการผสม (หัวข้อที่ 4.2.2) คือ มวลรวมในส่วนผสมบางส่วนจะขัดสีกันเอง และบางส่วนจะเสมือนถูกบดด้วยแผ่นกั้นผสมในโม่ผสม ทำให้ส่วนขนาดคละของมวลรวมผสมนั้นละเอียดลง คอนกรีตที่ถูกกวนอยู่ในโม่ผสมเป็นเวลานาน จึงมีสภาพค่อนข้างแก่ทราย